https://jmme.um.ac.ir/
DOI: 10.22067/jmme.2022.76096.1048

تأثیر حضور کربن بلک بر استحکام اتصال آلومینیوم/پلی‌اتیلن در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای *

مقاله پژوهشی

تکتم کیان افشار(۱) سمانه صاحبیان سقی(۲) محسن حداد سبزوار(۳)

چکیده *با پیدایش صنایع و رشد آن ها اتصال قطعات مختلف به یکدیگر به عنوان یک نیاز مهم مطرح شده است. به دلیل پیچیدگی روش‌های اتصال متداول، تمایل زیادی به پژوهش و تو سعه‌ی روش‌های ات صال جدید در سال‌های اخیر به وجود آمده ا ست . از این رو این پژوهش با هدف برر سی ا ستحکام ات صال آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به یک کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ذرات کربن بلک انجام شده است. در این مطالعه اتصال به وسیله‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشـــاشـــی نقطه‌ای به وجود آمده و پارامترهای جوشـــکاری از جمله ســـرعت چرخش ابزار، نرخ فروروی ابزار و عمق فروروی ابزار به ترتیب ۲۵۰۰rpm، ٤۰mm/min و ۳/۲mm درنظر گرفته شده‌است. همچنین به منظور ساخت ورقه‌های کامپوزیتی، پس از اختلاط پودر پلی‌اتیلن سنگین و فاز تقویت کننده کربن بلک با ا ستفاده از آ سیاب گلوله‌ای و با سرعت ۳۰۰rpm، از د ستگاه پرس گرم در دمای ۱۹۰ و تحت فشار ٤۵ تن ا ستفاده گردید. در پژوهش پیش رو تأثیر دو متغیر مدت زمان ماندگاری ابزار در قطعه کار و در صد وزنی ذرات و ساناي فاز تقویت کننده‌ی زمینه‌ی پلی‌اتیلن بر ا ستحکام جوش برر سی شد. مقادیر در نظر گرفته شـــده برای متغیر مدت زمان ماندگاری ۵،۱۰،۱۵و۲۰ ثانیه و برای متغیر فاز تقویت‌کننده ۲/۵ و ۵ درصـــد وزنی کربن بلک می‌باشـــند. خواص مکانیکی نیز شامل ا ستحکام کشش برشی در محل اتصال (ا ستحکام نقطه‌ی جوش) با انجام تست کشش برشی بر روی نمونه‌ها با سرعت ۲mm/min به د ست آمد. نتایج حا صل ن شان می‌دهد که با افزایش مدت زمان ماندگاری، برای پلی‌اتیلن خالص در زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه و برای نمونه های کامپوزیتی زمینه پلی اتیلن تقویت شده با کربن بلک در بازه زمانی ۱۰ ثانیه، اتصال مطلوب ایجاد شد و با افزایش زمان ماندگاری تا ۲۰ ثانیه به دلیل افزایش بیش از حد مذاب پلی‌اتیلن و آزاد شدن تنش‌های پسماند در طی فرایند انجماد، روند نزولی استحکام اتصال مشاهده شد.*

واژه‌های کلیدی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا، کربن بلک، استحکام کششی برشی.

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف از جمله صنعت اتومبیل، نیاز به مواد مقرون به صرفه با استحکام بالا و وزن کم در ساخت بدنه خودرو به صورت روزافزونی احساس می‌شود. پلیمرها در رده پرمصرف‌ترین مواد در جهان قرار گرفته‌اند، در حقیقت سهولت فرایندپذیری پلیمرها و پلاستیک‌ها موجب شده‌است که آن‌ها تبدیل به پرکاربردترین مواد عصر حاضر شوند [1-3]. به دلیل چگالی کم و توانایی آن‌ها برای شکل‌گیری و قالب‌گیری در دماهای کم، از پلیمرها به جای مواد سنتی مانند فلزات در ساخت قطعات ترکیبی طی فرایند مونتاژ قطعات استفاده می‌شود [4-9]. همین امر سبب شده‌است که توجه بسیاری از محققان به اتصال مواد پلیمری و یا مواد پلیمری با سایر مواد از جمله فلزات جلب شود. به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی پلیمرها و فلزات، اعمال روش های مرسوم جوشکاری برای اتصال این مواد غیرممکن است. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی پربازده در مقایسه با اتصال دهی شیمیایی چسبی یا مکانیکی با پیچ و پرچ مطرح شده است [10]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرایندی مناسب به منظور اتصال‌دهی حالت جامد فلز به پلیمر است. در گذشته این روش برای اتصال‌دهی آلیاژهای آلومینیوم به کار می‌رفت، اما به علت مزایای ثابت شده‌ی آن این روش برای جوشکاری مواد فلزی دیگر، پلیمرها و حتی اتصال‌دهی مواد غیرمشابه نیز به کار می‌رود [11,12].

در سال ۲۰۰٤ روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت نقطه‌ای اجرا شد که روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) نام گرفته‌است. فرایند جوشکاری

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۱/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/٤/۷ می‌باشد.
(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالوژی گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) نویسندۀ مسئول، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳) استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
Email: s.sahebian@um.ac.ir

اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل سه مرحله می‌باشد: فروروی، اغتشاش و خروج ابزار. این فرایند با چرخش ابزار در سرعت چرخشی بالا آغاز می‌شود. سپس ابزار به نقطه‌ی جوش وارد شده تا شانه‌ی ابزار در تماس با قسمت بالایی سطح قطعه کار بالایی قرار بگیرد. حرکت فرورونده‌ی ابزار باعث می‌شود که مقداری از ماده خارج شده و وقتی ابزار به عمق از پیش تعیین شده می‌رسد، حرکت فروروی پایان یافته و مرحله‌ی اغتشاش شروع می‌شود. در این مرحله پین در قطعه کار بدون فروروی می‌چرخد. گرمای اصطکاکی ایجاد شده در مرحله‌ی فروروی و اغتشاشی سپس گرم شدن ماده‌ی نزدیک به ابزار شده و در نتیجه مواد قطعه کار بالایی و پایینی نرم شده و در مرحله‌ی اغتشاش با یکدیگر مخلوط می-گردند. شانه‌ی ابزار تنشی فشاری را روی ماده‌ی نرم شده ایجاد می‌کند و در نتیجه یک اتصال حالت جامد در مرحله‌ی اغتشاش شکل می‌گیرد. زمانی که اتصال مورد نظر به دست آمد، فرایند پایان یافته و ابزار از قطعه کار خارج شده و در اثر خارج شدن ابزار از قطعه کار سوراخی در وسط اتصال ایجاد می‌شود [13]. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام جوش ترموپلاستیک‌ها از جمله ورق‌های پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا بسیار تأثیرگذار است. از متغیرهای فرایند مذکور می توان به سرعت چرخش ابزار، نرخ فروری و عمق فروروی ابزار، زاویه‌ی شیب ابزار و شکل هندسی آن اشاره نمود [14,15].

در سال ۲۰۱۱ م. کمال بلقی و ا. ایرفان یوکلر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای جهت اتصال ورقه‌های پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که زمان ماندگاری و سرعت چرخش ابزار بر استحکام اتصال تاثیرگذارند. با افزایش زمان ماندگاری دما در منطقه‌ی جوش افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال نیز افزایش می‌یابد، همچنین اغتشاش پین با سرعت چرخشی ابزار افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیز روند صعودی دارد. ملندر و همکارانش قابلیت اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلی فنیلن سولفید را توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نموده و تأثیر پارامترهای فرایند را بر استحکام اتصال و شکست نگاری مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق منطقه‌ی جوش شامل مخلوطی از تکه‌های آلومینیوم بوده که توسط زمینه‌ی پلی فنیلن سولفید احاطه شده‌اند. آن‌ها نشان دادند که اندازه‌ی تکه‌های فلزی با افزایش سرعت چرخش ابزار افزایش می یابد [16]. شاهمیری و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم را به ورقه‌های پلی پروپیلن (polypropylene) با اتصال اصطکاکی اغتشاشی که در آن ورقه‌ها به صورت لبه‌ای(لبه روی هم)قرار گرفته‌اند، بررسی نموده و تأثیر گرمای ورودی بر ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده یک لایه‌ی واسط در فصل مشترک آلومینیوم/پلی‌اتیلن تشکیل شده که شامل عناصر اکسیژن، آلومینیوم و کربن می‌باشد. اما به دلیل چسبندگی نسبتا ضعیف این لایه به زمینه، شکافی بین آلومینیوم و زمینه‌ی پلیمری تشکیل و باعث کاهش استحکام برشی با افزایش گرمای ورودی می‌شود [17]. باله و همکاران از جوشکاری فراصوت برای اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵٤ به صفحات پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استحکام برشی اتصال به MPa ۳۲ رسیده است [18]. یوکی اوگاوا و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن را با به کار بردن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی نموده و تأثیر عملیات سطحی انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم، بر خواص خستگی و مکانیزم شکست اتصال مواد غیرمشابه را مورد مطالعه قرار دادند. عملیات سطحی انجام شده شامل ایجاد پوشش آلی و قرار دادن یک لایه‌ی متخلخل بر روی آلیاژ آلومینیوم می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق میانگین مقاومت کششی برای آلیاژ آلومینیوم بدون عملیات سطحی و آلیاژ آلومینیوم پوشش داده شده با پوشش آلی و لایه متخلخل به ترتیب ۵/۷ ، ۷/٤ و ٦٦ کیلونیوتن تخمین زده‌شد، آنها ادعا نمودند که با انجام عملیات سطحی، استحکام اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای افزایش می‌یابد [19].

حامد آقاجانی و همکارانش در پژوهشی که بر روی جوشکاری FSW آلیاژ آلومینیوم-منیزیم AA۵۰۵۸ به ورقه‌های پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات (Polymethyl methacrylate) (PMMA) انجام دادند، تأثیر زاویه‌ی شیب ابزار را بر روی کیفیت سطح جوش بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که در زوایای پایین‌تر، شکل جوش غیرمشابه ناپیوسته به نظر می‌رسد به دلیل اینکه جریان مواد از لبه‌ی جلویی به پشتی متوقف می‌شود، در حالی که با افزایش زاویه‌ی شیب ابزار، ظاهر سطح جوش‌های غیرمشابه همگن‌تر شده و همچنین از مقادیر بالاتری از تکه‌های آلومینیوم از آلیاژ پایه آلومینیوم جدا شده و به منطقه‌ی جوش افزوده می‌شود [14]. در پژوهشی دیگر نیز که توسط حامد آقاجانی و عبدالرضا سیمچی بر روی اتصال T شکل پلی‌متیل‌متاکریلات و آلیاژ

آلومینیوم AA۵۷۵٤ با استفاده از جوشکاری FSW انجام گرفته‌است و پارامترهای جوشکاری را مورد بررسی قرار دادند، مشخص شد که با افزایش زاویه‌ی شیب، دمای پیک نیز افزایش می‌یابد اما ناحیه‌ی SZ کاهش یافته و HAZ بزرگ‌تری تشکیل می‌شود. همچنین در سرعت‌های چرخش پایین و سرعت حرکت ابزار بالا به دلیل گرمای ورودی پایین‌تر ایجاد شده ناحیه‌ی SZ کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که عمق فرووری ابزار نیز بر روی نواحی SZ و HAZ تأثیرگذار است به گونه‌ای که با افزایش عمق فرووری منطقه‌ی SZ کاهش یافته و منطقه‌ی HAZ افزایش می‌یابد [20].

آمانسیو-فیلو و همکارانش قابلیت اتصال نقطه‌ای اصطکاکی پلی‌فنیلن سولفید تقویت شده با فیبر منیزیمAZ31-O/ شیشه و فیبر کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد اتصال اصطکاکی نقطه‌ای، اتصالات هیبریدی کامپوزیت PPS-Mg AZ31 قوی ایجاد می‌کند. استحکام اتصال به دست آمده برابر با ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد [21]. لیو و همکارانش از جوشکاری اصطکاکی لبه‌ای (FLW) (Friction lap joining) برای اتصال MC NYLON6 به صفحات AA٦٠٦١ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای جوشکاری تاثیر بسیار زیادی بر استحکام برشی اتصال (۸–۵MPa) دارد [3].

موضوع مهمی که در این پژوهش به آن پرداخته شده است رفع مشکلات اتصال‌دهی نامتجانس (Heterogeneous) قطعاتی است که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به یکدیگر می‌باشند مانند اتصال قطعات فلزی به قطعات پلیمری یا کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با مواد کربنی. به همین منظور پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از جمله عمق فرووری (Plunging depth)، نرخ فرووری (Plunging rate)، زمان ماندگاری (Dwell time) ابزار داخل قطعه کار، سرعت چرخش ابزار وهمچنین درصد ذرات کربنی در زمینه‌ی پلیمری جهت دست‌یابی به اتصالی با ظاهر و خواص مناسب میان آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و کامپوزیت زمینه پلیمری بهینه گردیده و سپس امکان برقراری اتصال بین آلومینیوم و پلیمر با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی شده‌است. همچنین هدایت حرارتی و الکتریکی پلی اتیلن تقویت شده با مواد کربنی برای مطالعه‌ی تأثیر زنجیره‌های ذرات هدایت کننده در هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها اندازه‌گیری شدند. با افزایش مقدار کربن، زنجیره‌های هدایت کننده افزایش یافته و در نتیجه مقدار هدایت حرارتی افزایش می‌یابد.

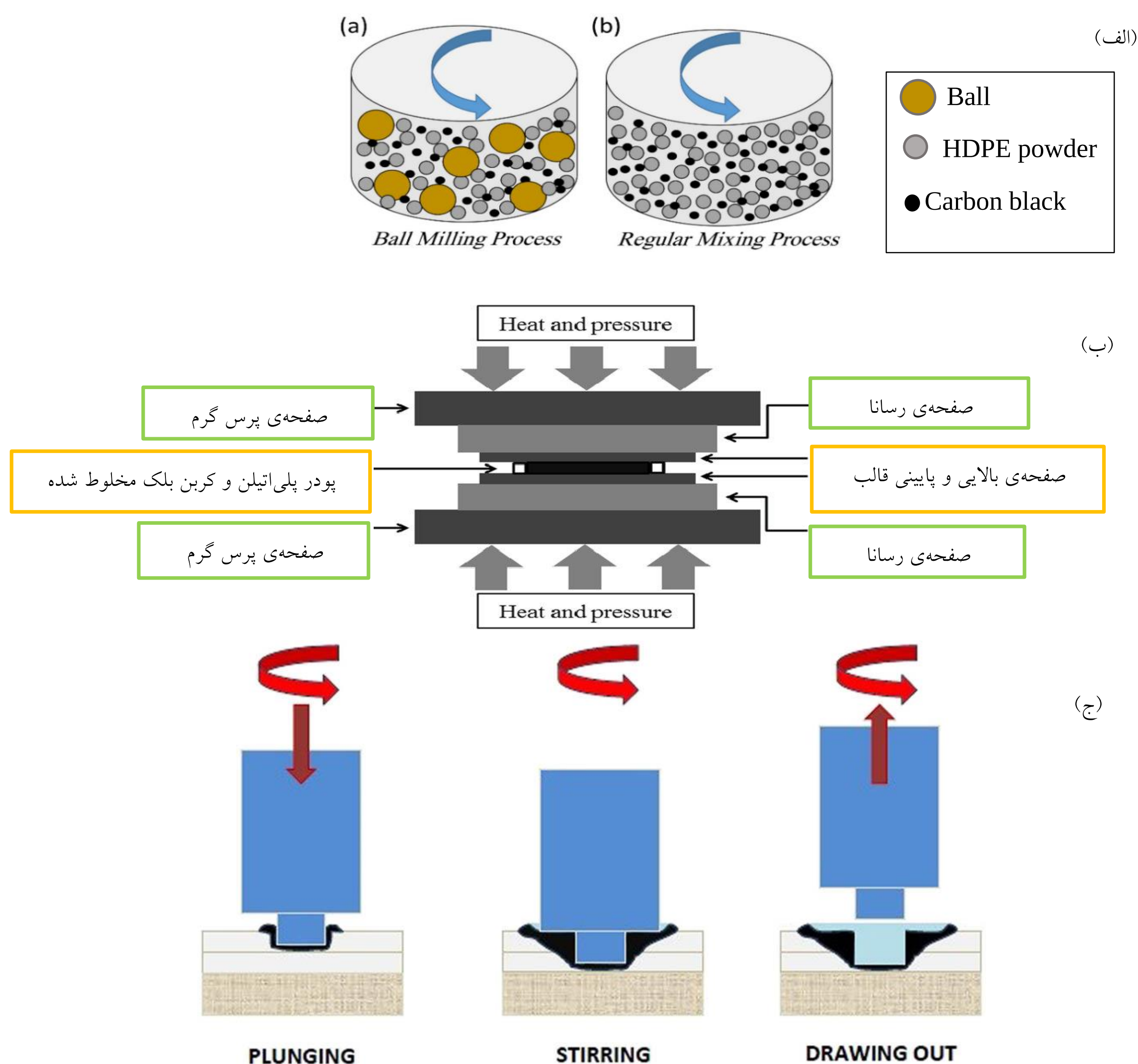
مواد و روش تحقیق

در این تحقیق جهت اتصال فلز–پلیمر، ورقه‌های آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ با ابعاد ۵cm × ۱۰cm و به ضخامت ۲ میلی‌متر به عنوان بخش فلزی استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی در جدول (۱) آمده است. همچنین برای بخش پلیمری، ورقه‌های پلی اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا و کامپوزیت‌های زمینه پلی‌اتیلن تقویت شده با دوده (پودر کربن سیاه) N-220 و با ابعاد ۵cm × ۱۰cm و ضخامت ۲ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه پرس گرم ساخته شدند.

به منظور ساخت کامپوزیت تقویت شده با ۲/۵٪ وزنی کربن بلک و کامپوزیت تقویت شده با ۵ ٪ وزنی کربن بلک در ابتدا مقداری پودر پلی‌اتیلن سنگین و کربن بلک با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای با سرعت ۳۰۰rpm به مدت ۱۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شده و پس از آن توسط دستگاه پرس گرم ۵۰ تن هیدرولیک مدل sph 500 ، تحت فشار ٤۵ تن و دمای ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تهیه شدند. طرح‌واره‌ای از مراحل انجام شده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱ مشخصات ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳

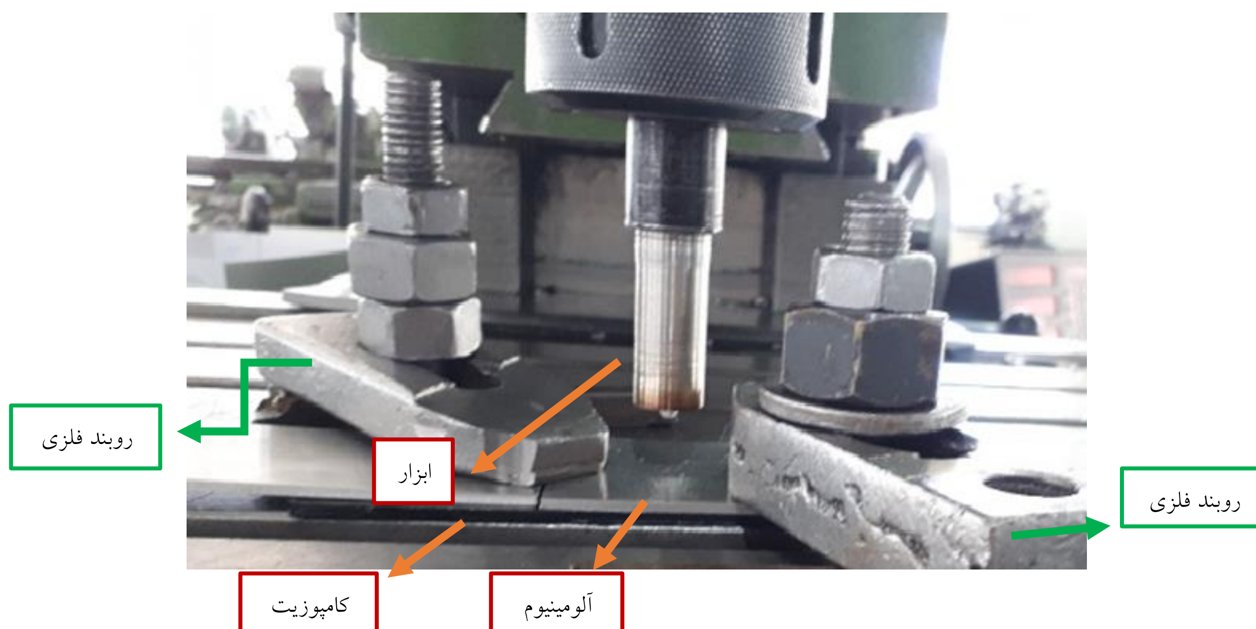
عنصر	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr
درصد	۰/٤	٤/۹– ۰/٤	۰/۱	٤– ۰/۱	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۵– ۰/۰۵

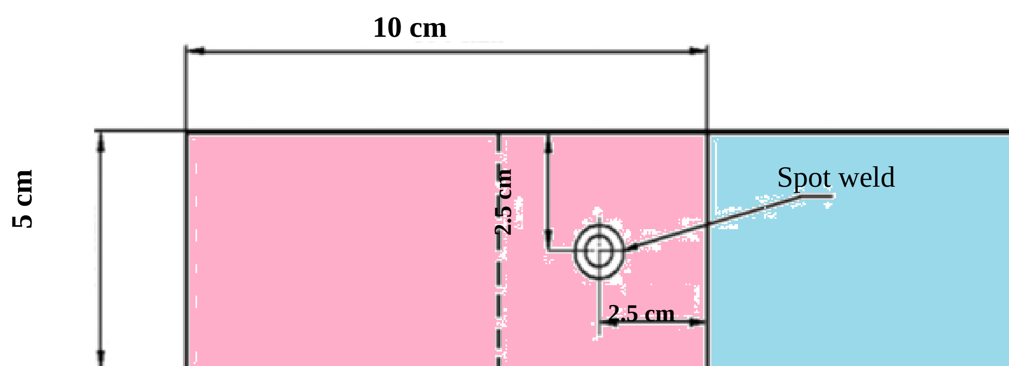


شکل ۱ شماتیک مراحل انجام شده در این تحقیق. الف) فرایند بال میل جهت اختلاط پودرها، ب) ساخت نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری با استفاده از دستگاه پرس گرم و ج) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلومینیوم آلیاژی به کامپوزیت زمینه پلیمری

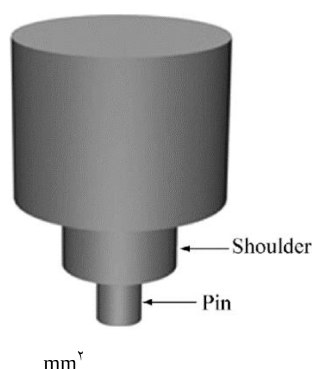
پس از ساخت نمونه‌ها یک قطعه کامپوزیت و یا پلیمری و یک قطعه آلومینیوم روی یکدیگر قرار گرفته به گونه‌ای که فلز آلومینیوم در قسمت فوقانی و کامپوزیت زمینه پلیمری در قسمت تحتانی قرار گرفته باشد و با استفاده از دستگاه فرز اونیورسال FP4MH ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با سرعت چرخش ۲۵۰۰rpm، عمق فروروی ۳/۲ میلی‌متر و نرخ فروروی mm/min ۴۰ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که از این پس به جهت رعایت اختصار FSSW نامیده می‌شود؛ به یکدیگر متصل شدند. شکل (۲) نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل ابزاری است که می‌تواند حرکات چرخشی و محوری (بالا و پایین) داشته‌باشد. ابزار مورد استفاده در این پژوهش شامل یک پین با قطرهای ۲ میلی‌متر و ٤ میلی‌متر و ارتفاع ۳/۲ میلی‌متر می‌باشد که در شکل (۳) نمایش داده شده است.





شکل ۲ شکل اتصال لبه روی هم قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی در دستگاه جوش FSSW



شکل ۳ ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به همراه معرفی اجزا

مهمترین قسمت انجام جوشکاری تعیین پارامترهای فرایند است. به منظور تعیین مطلوب‌ترین شرایط برای انجام جوشکاری، سرعت چرخش ابزار، عمق فروری و نرخ فروری را ثابت و به ترتیب برابر با ۲۵۰۰rpm، ۳/۲mm و ۴۰mm/min در نظر گرفته و تنها مدت زمان ماندگاری ابزار داخل قطعه کار متغیر فرض شد. پارامترهای متغیر در این پژوهش که شامل مدت زمان ماندگاری ابزار و درصد وزنی فاز تقویت کننده‌ی کربن بلک می‌باشد در جدول (۲) آمده است. جهت کاهش خطای آزمایش، جوشکاری نمونه‌ها با سه بار تکرار انجام شد. میزان استحکام کششی برشی نمونه‌ها با آزمون کشش برشی بر روی نمونه در

دمای اتاق و با سرعت ۲ mm/min با استفاده از دستگاه یونیورسال (Universal) ساخت شرکت ستام طبق استاندارد DIN EN ISO 14273 انجام گرفت.

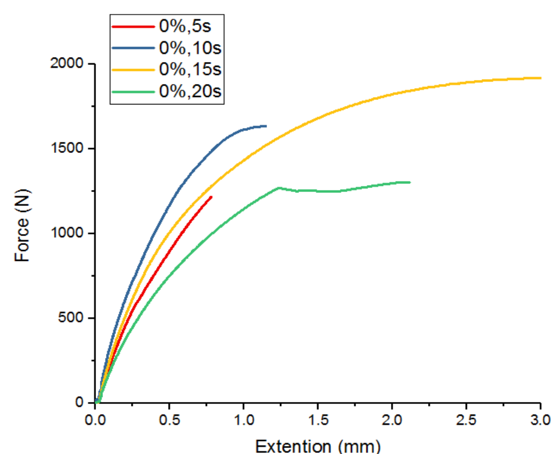
جدول ۲ جدول متغیرهای فرایند برای کامپوزیت تقویت شده با کربن بلک

درصد وزنی کربن بلک	٪ ۰	٪ ۲/۵	٪ ۵
مدت زمان ماندگاری	5s، ۱۰s، ۱۵s و ۲۰s	۵، ۱۰s، ۱۵s و ۲۰s	۵، ۱۰s، ۱۵s و ۲۰s

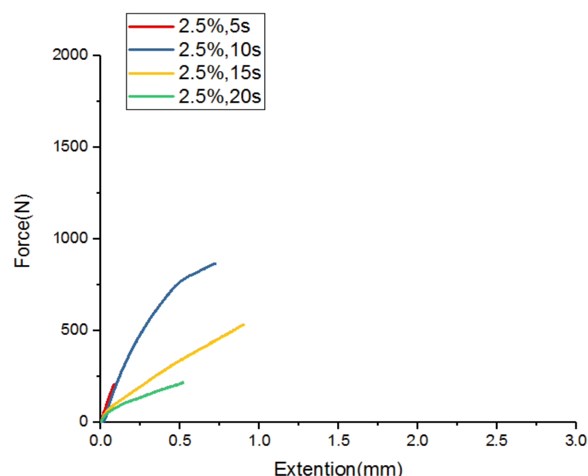
برای بررسی میکروسکوپی نمونه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان ماندگاری ۱۰ ثانیه از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (Scanning Electron Microscope) مدل LEO 1450VP شد. به همین منظور نمونه‌ها با استفاده از واترجت از مقطع عرضی اتصال در نقطه‌ی جوش برش زده شدند. همچنین جهت بررسی میکروسکوپی نمونه‌ی پلی‌اتیلن خالص از دستگاه میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) (Field Emission Scanning Electron Microscope) مدل LMU TESCAN BRNO-Mira3 استفاده شد. قبل از تصویربرداری از نمونه‌ها، ابتدا آن‌ها با استفاده از واترجت با اندازه‌های ۱cm×۱cm برش عرضی زده شده و سپس برای ایجاد پوشش رسانا از پوشش دهی با طلا استفاده شد.

نتایج و بحث

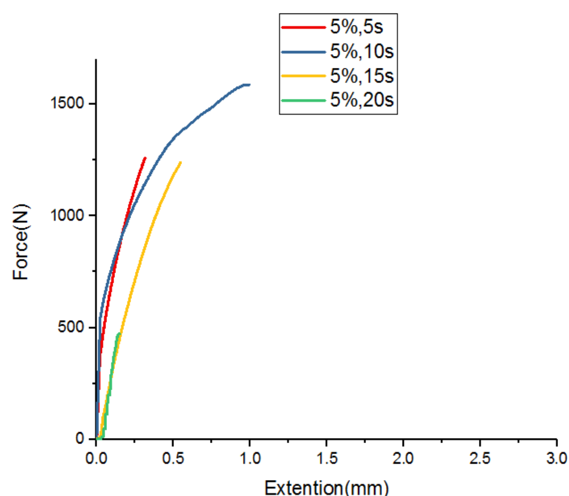
منحنی های نیرو-تغییر طول پلی اتیلن خالص و نمو نه های کامپوزیتی تقویت شـده با ۲/۵٪ و ۵٪ وزنی کربن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری مختلف در شکل (٤) آمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ٤ تغییرات نیرو-ازدیاد طول برای (الف) پلی اتیلن خالص، (ب) کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۲/۵ درصد وزنی کربن بلک، (ج) کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در زمان‌های ماندگاری 5s، ۱۰s، ۱۵s و ۲۰s

با توجه به شکل (٤-الف) و داده‌های جدول (۳)، با افزایش زمان ماندگاری تا ۱۵ ثانیه، به دلیل افزایش دمای موضعی در منطقه جوش، پلی اتیلن افزایش دمای بیشتری داشته‌است. در اثر این افزایش دما ، دمای پلی‌اتیلن به دمای ذوب رسیده و پلی‌اتیلن از حالت خمیری در زمان‌های ماندگاری پایین به حالت ذوب شده در زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه می‌رسد که این امر سبب افزایش سطح در تماس دو فاز و افزایش استحکام اتصال می‌گردد. همچنین در مدت زمان بیشتر از ۱۵ ثانیه به دلیل افزایش بیش از حد مذاب پلی‌اتیلن و آزاد شدن تنش‌های پسماند در طی فرایند

انجماد، روند نزولی استحکام اتصال مشاهده می‌شود.

در شکل (۴-ب) منحنی تغییرات نیرو بر حسب جابجایی کامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با ۲/۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری مختلف آمده است با توجه به شکل با افزودن کربن بلک به زمینه پلی اتیلن، قابلیت تغییر شکل و سیالیت در دماهای بالا در نمونه کامپوزیتی در قیاس با پلیمر خالص روند نزولی خواهد داشت. در نتیجه تر شدگی سطح آلومینیوم با حضور کربن بلک به سبب افزایش ویسکوزیته ساختار کامپوزیتی کاهش و بدین ترتیب استحکام برشی فصل مشترک نسبت به پلی اتیلن خالص کاهش یافته است. هر چند که افزودن کربن بلک سبب افزایش رسانش حرارتی ساختار کامپوزیتی نسبت به زمینه پلی اتیلن خالص شده است اما افزایش ویسکوزیته اثر مثبت رسانش حرارتی را خنثی نموده و روند کاهش استحکام مشاهده می شود. با توجه به نمودار نیرو جابجایی در بازه زمانی ۵ ثانیه زمان کافی جهت ایجاد اتصال مطلوب فراهم نشده است.درنتیجه نیروی لازم جهت شکست اتصال مقدار کمی است. اما با افزایش زمان تا ۱۰ ثانیه افزایش سطح نیروی قابل تحمل توسط اتصال مشاهده شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی عامل رسانایی حرارتی بر ویسکوزیته می‌باشد.

منحنی های نیرو – جابه‌جایی نمونه کامپوزیتی پلی اتیلن تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در شکل (۴-ج) آمده است افزایش کربن بلک در زمینه‌ی پلی‌اتیلن سبب افزایش ویسکوزیته‌ی زمینه (اثر منفی حضور کربن بلک) و همچنین سبب افزایش هدایت حرارتی پلی‌اتیلن(اثر مثبت حضور کربن بلک) در ایجاد اتصالی با خواص مکانیکی مطلوب شده‌است. در نتیجه افزایش هدایت حرارتی زمینه‌ی پلی‌اتیلن به واسطه‌ی افزایش فاز تقویت کننده‌ی کربن بلک در زمان‌های ماندگاری ثابت سبب حس دمای بالاتر نسبت به پلی اتیلن خالص و کامپوزیت تقویت شده با درصد کمتر کربن بلک می‌گردد.

جدول ۳ نتایج به دست آمده از آزمون کشش برشی سطح مقطع اتصال نمونه‌های پلی‌اتیلن خالص در مدت زمان‌های ماندگاری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

نمونه‌ها	نیروی بیشینه (N)	سطح مقطع (mm^2)	نیروی متوسط (N)	تنش متوسط (Mpa)	سطح مقطع متوسط (mm^2)
٪۰ , ۵s	۱۲۱۷	۱۹۲۸	۱۱۵۴/۳	۰/۶۱	۱۸۹۶/۷
	۱۰۷۷	۱۸۹۵			
	۱۱۶۹	۱۸۶۷			
٪۰ , ۱۰s	۱۵۱۰	۲۰۰۱	۱۵۰۵/۳	۰/۷۵	۱۹۹۸/۳
	۱۳۷۱	۲۰۲۸			
	۱۶۳۵	۱۹۶۶			
٪۰ , ۱۵s	۱۷۸۳	۱۸۱۷	۱۷۸۵/۷	۰/۸۶	۲۱۰۸/۳
	۱۹۲۸	۲۰۱۶			
	۱۶۴۶	۲۴۹۲			
٪۰ , ۲۰s	۱۳۲۰	۱۹۷۵	۱۴۹۱/۷	۰/۶۷	۲۲۱۴/۷
	۱۳۰۵	۲۱۴۳			
	۱۸۵۰	۲۵۲۶			

با توجه به داده های جدول (٤) سطح مقطع متوسط اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد کربن بلک روند نزولی دارد. این بدان معنی است که ویسکوزیته نمونه تاثیر بیشتری بر روی سیالیت پلی‌اتیلن ذوب شده نسبت به رسانش حرارتی ساختار کامپوزیتی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در تمامی زمان‌های ماندگاری فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش درصد کربن بلک به سبب سطح مقطع کمتر افزایش یافته است. علاوه بر این در بازه‌ی زمانی ۵ تا۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می‌شود و پس از آن کاهش استحکام اتصال در زمان‌های طولانی تر دیده می‌شود. علت افزایش استحکام اتصال با افزایش مدت زمان ماندگاری از ۵ ثانیه تا ۱۰ ثانیه، دمای بالاتری است که ساختار کامپوزیتی در اثر حضور کربن بلک و به دلیل افزایش رسانایی حرارتی زمینه، در زمان‌های ماندگاری بالا داشته که سبب غلبه‌ی رسانایی حرارتی کامپوزیت بر ویسکوزیته‌ی آن شده و همین امر سبب افزایش سطح ترشده‌ی آلومینیوم توسط کامپوزیت و ذوب شدگی و تغییرشکل شدید کامپوزیت در حین جوشکاری می گردد. امادر مدت زمان‌های ماندگاری بالاتر از ۱۰ ثانیه مجدداً به دلیل ذوب بیش از حد کامپوزیت استحکام اتصال کاهش می‌یابد.

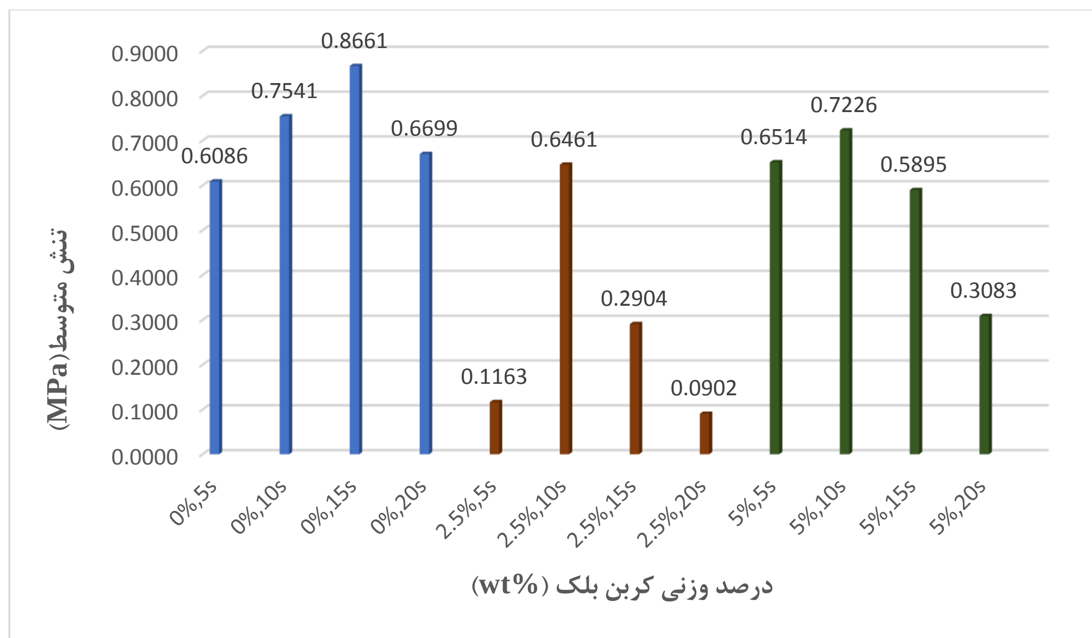
جدول ٤ نتایج به دست آمده از آزمون کشش برشی و سطح مقطع اتصال نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۵ و ۲/۵ درصد وزنی کرن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

نمونه‌ها	نیروی بیشینه (N)	سطح مقطع (mm^2)	نیروی متوسط (N)	تنش متوسط (Mpa)	سطح مقطع متوسط (mm^2)
٪ ۲/۵ , ۵s	۲٤۷	۲۰۰۷	۲۳۲/۵	۰/۱۱٦	۱۹۹۸/۵
	۲۱۸	۱۹۹۰			
٪ ۲/۵ , ۱۰s	۱۲٦۰	۲۲۰۵	۱٤۰۰/۵	۰/٦۵	۲۱۷۱/۵
	۱۵٤۱	۲۱۳۸			
٪ ۲/۵ ,۱۵s	۵۳۱	۲۱۱٤	٦٦۱	۰/۲۹	۲۲۷٤
	۵۸۲	۲٤۱۰			
	۸۷۰	۲۲۹۸			
٪ ۲/۵ ,۲۰s	۲۱۸	۲٤٦۲	۲۱۹/۷	۰/۰۹	۲٤۳۳/۷
	۲۰۹	۲۳۳۸			
	۲۳۲	۲۵۰۱			
٪ ۵ , ۵s	۹۷٤	۱۸۲۵	۱۱٦/۵	۰/٦۵	۱۷۳۱
	۱۲۵۹	۱٦۳۷			
٪ ۵ , ۱۰s	۱۱۸۲	۲۰۲٦	۱٤٦۳	۰/۷۲	۲۰۲٦/۳
	۱۵۸۸	۱۹٤۵			
	۱٦۱۹	۲۱۰۸			
٪ ۵ , ۱۵s	۱۳۱٦	۲۲۳۲	۱۲۷۷	۰/۵۹	۲۱٦٦
	۱۲۳۸	۲۱۰۰			
٪ ۵ , ۲۰s	٤۸۳	۲۳۷٤	۷۱۹/۳	۰/۳۱	۲۳۰۸
	٤۷۲	٤۷۲			
	۱۲۰۳	۱۲۰۳			

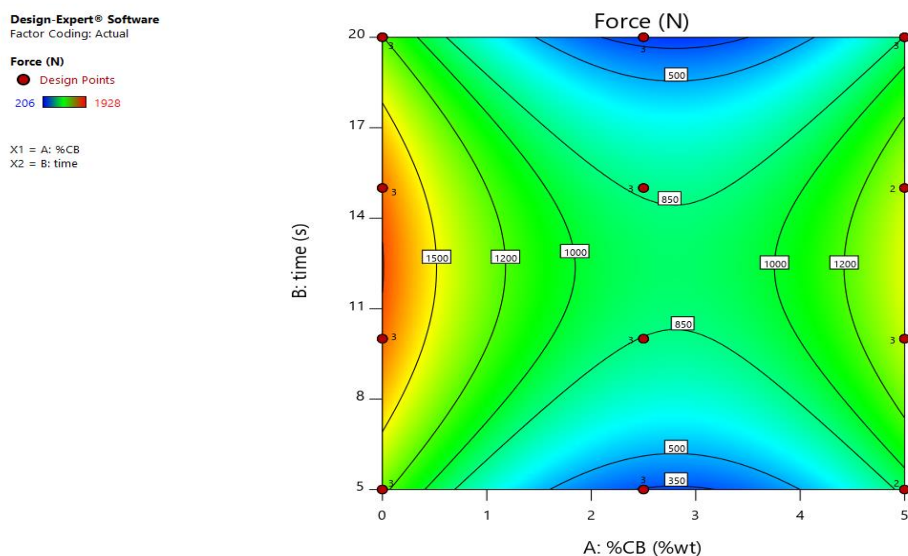
به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل از آزمون کشش، نمودار میله‌ای مقایسه تنش متوسط برای پلی اتیلن و کامپوزیت-های آن در زمان‌های ماندگاری مختلف در شکل (۵) رسم شده است. با توجه به شکل در نمونه پلی‌اتیلن خالص مدت زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه جهت ایجاد اتصال مناسب مورد نیاز است و در ساختارهای کامپوزیتی مدت زمان ۱۰ثانیه جهت نیل به بیشینه استحکام کافی است. نمونه‌ی کامپوزیتی شامل ۲/۵ درصد وزنی به سبب هدایت حرارتی کمتر کمینه استحکام اتصال و سطح در تماس با آلومینیوم را داراست.لازم به ذکر است که استحکام و پایداری حرارتی مطلوب‌تر ساختار کامپوزیتی در حضور کربن بلک نسبت به پلی اتیلن مشاهده شده است [4]

پس از انجام آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آماری Design expert طبق منحنی به دست آمده در شکل (٦) که به آن منحنی contour گفته می شود، از صحت نتایج به دست آمده از آزمون کششی برشی اطمینان حاصل شد. در این منحنی با حرکت از رنگ آبی به رنگ قرمز میزان نیروی به دست آمده در درصدهای وزنی مختلف کربن بلک، در زمان های ماندگاری متفاوت افزایش می یابد. به همین ترتیب برای نمونه‌ی پلی‌اتیلن خالص از زمان ماندگاری ۱۰ تا ۱۵ ثانیه رنگ زمینه از سبز به قرمز تغیر می یابد، زیرا که پلی‌اتیلن خالص در زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه بیشترین میزان استحکام را داراست و سپس با افزایش زمان ماندگاری از ۱۵ تا ۲۰ ثانیه به دلیل کاهش استحکام مجدد رنگ منحنی از قرمز به سبز تغییر می‌یابد. برای نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵ ٪ و ۵ ٪ کربن بلک در زمان ۱۰ ثانیه که این نمونه ها بیشترین مقدار استحکام را دارند، رنگ منحنی سبز بوده و با افزایش زمان ماندگاری و در نتیجه کاهش استحکام رنگ منحنی به آبی که نشان دهنده‌ی کمترین میزان نیرو است، تغییر می‌یابد.

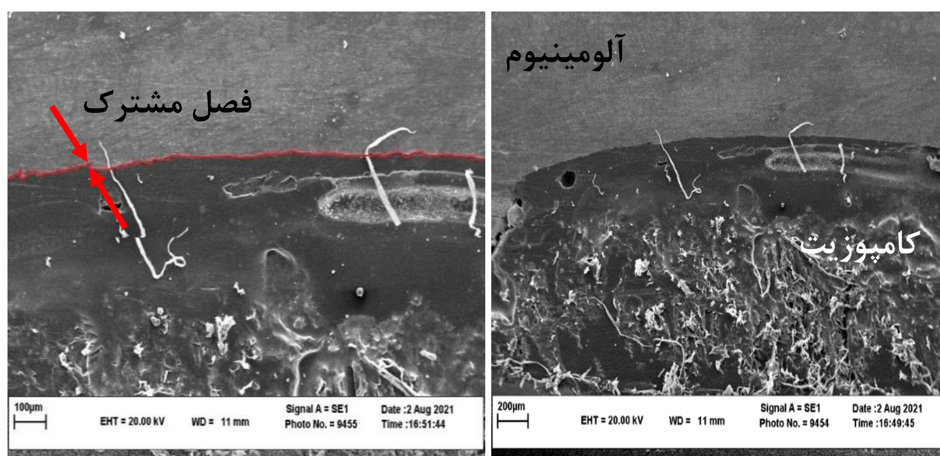
تصاویر به دست آمده از مقطع عرضی اتصال نمونه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در نقطه‌ی جوش با استفاده از میکرو سکوپ الکترونی روبشی(SEM) در شکل (۷) مشاهده می‌شود، این شکل یک فصل مشترک چسبنده بین آلومینیوم و کامپوزیت را نشان می‌دهد. شکل (۸) نیز تصویر به دست آمده از مقطع عرضی اتصال نمونه‌ی پلی‌اتیلن خالص را با استفاده از میکرو سکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) خالص نشان می‌دهد. در این تصاویر ناهمواری‌های ایجاد شده در فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت یا پلی‌اتیلن خالص نشان‌دهنده‌ی ایجاد قفل‌شوندگی مکانیکی بین نمونه ها و درنتیجه ایجاد یک فصل‌مشترک چسبنده(اتصالی مطلوب) می‌باشد.



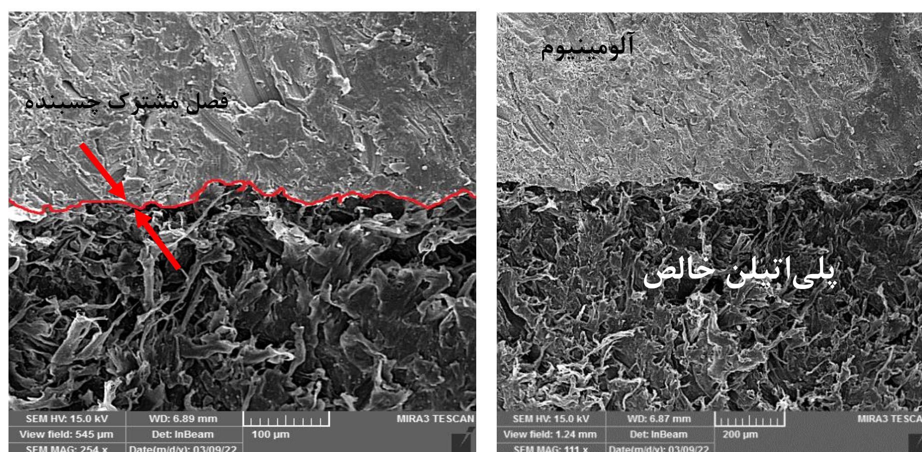
شکل ۵ نمودار میله‌ای استحکام متوسط پلی اتیلن خالص و کامپوزیت‌های آن در زمان‌های ماندگاری مختلف



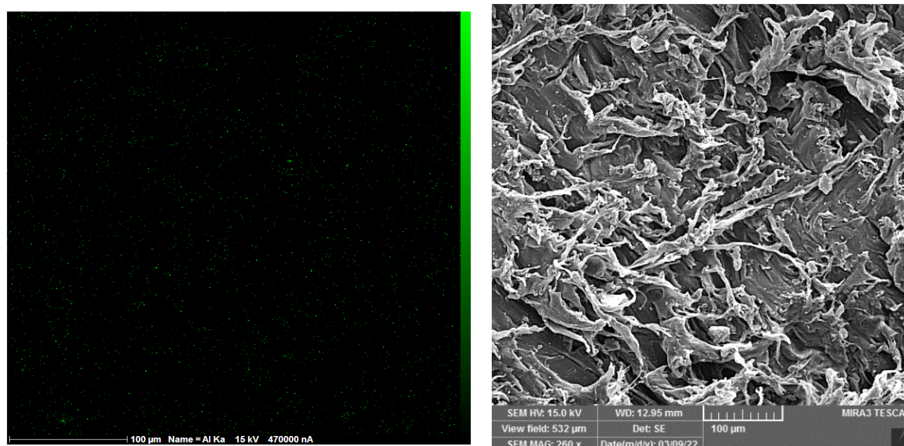
شکل ٦ نمودار contour حاصل از نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار Design expert برای کامپوزیت تقویت شده با کربن بلک



شکل ۷ تصویر SEM از فصل مشترک ما بین آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان ۱۰s در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰x و (ب) ۲۰۰x



شکل ۸ تصویر FESEM از فصل مشترک مابین آلومینیوم و پلی‌اتیلن خالص در مدت زمان ماندگاری ۱۵s و در بزرگنمایی‌های (الف)۱۰۰x و (ب) ۲۵۰x



(ب) (الف)

شکل ۹ آنالیز عنصری نمونه‌ی پلی‌اتیلن خالص در منطقه‌ی اغتشاش

همچنین از نمونه‌ی پلی‌اتیلن خالص اتصال یافته به آلومینیوم آنالیز عنصری تهیه گردید که در شکل (۹) آورده شده‌است. طبق شکل ذرات آلومینیوم در ناحیه‌ی اغتشاش در زمینه‌ی پلی‌اتیلنی مشاهده می‌شوند. به عبارتی در اثر اغتشاش پین ابزار در داخل قطعه و با سرعت بالا تکه‌های آلومینیوم جدا شده از فلز آلومینیوم در منطقه‌ی اغتشاش وارد زمینه‌ی پلیمری شده که این ذرات آلومینیوم باعث تقویت زمینه‌ی پلی‌اتیلنی می‌گردند.

نتیجه‌گیری

۱. در این تحقیق به بررسی حضور کربن بلک بعنوان فاز تقویت کننده در زمینه پلی اتیلن در ایجاد اتصال مطلوب به آلومینیوم به روش جو شکاری ا صطکاکی اغت شا شی نقطه‌ای پرداخته شد. به این منظور دو پارامتر درصد وزنی کربن بلک و مدت زمان ماندگاری ابزار در قطعه کار بعنوان متغیرهای فرایند درنظر گرفته شد. نتایج ارزیابی ها نشان داد که با افزایش زمان ماندگاری ابزار و افزایش دما در منطقه اتصال در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۲/۵ و ۵ درصد وزنی کربن‌بلک که رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به پلی‌اتیلن خالص دارند در بازه‌ی زمانی ۵ تا۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می‌شود، در حالی که این مشاهدات را برای پلی‌اتیلن در زمان‌های بی‌شتر از ۱۵ ثانیه می‌توان دید. نتایج به دست آمده در این مطالعه با نتایج حاصل شده از تحلیل‌های آماری کاملاً مطابقت دارد.

۲. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده‌ی ایجاد فصل مشترک مطلوب بین آلومینیوم و پلی‌اتیلن خالص و همچنین آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با کربن بلک می باشد.

مراجع

1. Moshwan, R., Rahmat, S., Yusof, F., Hassan, M., Hamdi, M. and Fadzil, M., "Dissimilar friction stir welding between polycarbonate and AA 7075 aluminum alloy", *Materials Research*, Vol.106, No. 3, pp. 258-266, (2015).
2. Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Sahraeinejad, S., Chen, J., Shalchi, B., Li, J., "Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high-density polyethylene", *Materials Characterization*, Vol. 98, pp.73-82, (2014).
3. Liu, F.C., Liao, J. and Nakata, K., "Joining of metal to plastic using friction lap welding", *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 236-244, (2014).
4. Formela, K., Kuranska, M. and Barczewski, M., "Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials", *Polymers*, Vol. 14, No. 5, p.1050, (2022).

5. Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. and Elhafi, A., "Polymer composite materials: A comprehensive review", *Composite Structures*, Vol. 262, p. 113640, (2021).
6. Arefin, A. M. E., Khatri, N. R., Kulkarni, N. and Egan, P. F., "Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications", *Polymers*, Vol. 13, No. 9, p. 1499, (2021).
7. Formela, K., Zedler, L., Hejna, A. and Tercjak, A., "Reactive extrusion of bio-based polymer blends and composites – Current trends and future developments", *Express Polymer Letters*, Vol. 12, No.1, pp. 24-57, (2018).
8. Wong, K. and Abbas Jawad, Z., "A review and future prospect of polymer blend mixed matrix membrane for CO_2 separation", *Polymer Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1-18, (2019).
9. Roy, K., Debnath, S. C. and potiyaraj, P., "A Review on Recent Trends and Future Prospects of Lignin Based Green Rubber Composites", *Polymers and the Environment*, Vol.28, No. 2, pp. 367-387, (2020).
10. Karami Pabandi, H., Movahedi, H., Kokabi, A. H., "A New Refill Friction Spot Welding Process for Aluminum/Polymer Composite Hybrid Structures", *Composites Structures*, Vol. 174, pp. 59-69, (2017).
11. Yousefpour, A., Hojjati, M. and Immarigeon, J. P., "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites", *Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 303-341, (2004).
12. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering*, Vo1. 50, No. 1-2, pp. 1-78, (2005).
13. Yang, X. W., Fu, T. and Li, W. Y., "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property, and Process Modelling", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, p. 11, (2014).
14. Aghajani Derazkola, H., Kashiry Fard, R. and Khodabakhshi, F., "Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminum alloy and PMMA polymer", *welding in world*, Vol. 62, No. 1, pp. 117-130, (2018).
15. Kemal Bilici, M. and Irfan Yukler, A., "Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets", *Materials & Design*, Vol. 33, pp. 545-550, (2012).
16. Ratanathavorn, W. and Melander, A., "Dissimilar joining between aluminium alloy (AA 6111) and thermoplastics using friction stir welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, pp. 222-228, (2015).
17. Shahmiri, H., Movahedi, M. and Kokabi, A.M., "Friction stir lap joining o aluminum alloy to polypropylene sheets", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, No. 2, pp. 20-126, (2017).
18. Lionetto, F., Balle, F., Maffezzoli, A., "Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites", *Materials Processing Technology*, Vol. 247, pp. 289-295, (2017).
19. Ogawa, Y., Xiong, Y., Akebono, H., Kato, M., Tanaka, K. and Sugeta, A., "Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre- reinforced Plastic", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 23, No. 1, pp. 79-86, (2018).
20. Aghajani Derazkola, H., and Simchi, A. R., "An investigation on the dissimilar friction stir welding of T-joints between AA5754 aluminum alloy and poly(methyl methacrylate)", *Thin-Walled structures*, Vol. 135, pp. 376-384, (2019).
21. Amancio-Filho, S. T., Bueno, C., Santos, J. F., Huber, N. and Hage Jr, E., "On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 10-11, pp. 3841-3848, (2011).